نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 19، شماره 2، تابستان 1400، ص. 120-107

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 2, Summer. 2021, p. 107-120

مقاله پژوهشی

بررسی اثر منابع سیلیسیمی در رشد و تولید غده‌های بذری سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در سه نوع بافت خاک

مهدیه سلطانی[1]، محمد کافی[2]، احمد نظامی[3*]، حمیدرضا تقی‌یاری[4]

تاریخ دریافت: 1396/06/25
تاریخ پذیرش: 1397/02/05

چکیده

سیلیسیم از طریق تخفیف اثرات تنش‌های محیطی و تأثیر بر جذب برخی عناصر ضروری، رشد گیاهان را بهبود می‌دهد. در این آزمایش، اثر چهار ترکیب سیلیسیم‌دار (نانوسیلیکا، سیلیکات‌سدیم، بنتونیت و نانورس) در دو غلظت (1000 و 2000 ppm) بر روی رشد و عملکرد غده‌های بذری سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* Var. Agria)، در سه نوع خاک (رس لوم، لوم و لوم شنی) در شرایط گلخانه بررسی شد. با توجه به عدم رشد و توسعه گیاهان در خاک رس‌لوم، مقایسه بین تیمارهای اعمال شده فقط در خاک لوم و خاک لوم‌شنی انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که علی‌رغم عدم رشد و توسعه بیشتر برگ و ساقه در گیاهان تحت تیمار سیلیسیم نسبت به تیمار شاهد، خصوصیات مربوط به غده‌های بذری تیمار شده نسبت به شاهد بهبود یافت و در نهایت باعث افزایش نسبت وزن خشک غده‌های بذری به وزن خشک اندام هوایی شد. بررسی اثر اعمال ترکیبات سیلیکاته در غلظت‌های مختلف بر روی تغییرات عملکرد قابل فروش (وزن تر غده‌های بذری) از طریق آنالیز خوشه‌ای و تجزیه علیت نشان داد که در هر دو نوع خاک،کاربرد بنتونیت با غلظت 2000 ppm سبب بهبود وزن غده‌های بذری شد.

واژه‌های کلیدی: بنتونیت، سیلیسیم، غده‌های بذری، مینی‌تیوبر، نانوسیلیکا

مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)، یکی از چهار گیاه مهم زراعی جهان است (FAO, 2015)، که در اغلب مناطق دنیا و در گستره‌ی وسیعی از طول و عرض جغرافیایی، آب‌وهوا و ارتفاع از سطح دریا قابل رشد است و تقریباً هیچ گیاه زراعی در انرژی و ارزش غذایی در واحد سطح، با آن برابری نمی‌کند (Sieczka *et al*., 1992).

بیماری‌های ویروسی یکی از بزرگترین مشکلات تولید سیب‌زمینی هستند که همه ساله خسارت‌های شدیدی به این محصول وارد می‌کنند (Singh *et al*., 2008). از آنجایی که سیب‌زمینی با غده تکثیر می‌شود، امکان تولید غده‌های بذری سالم (Tierno *et al*., 2014) از گیاهچه‌های عاری از ویروس (تولید شده با روش کشت‌بافت) وجود دارد (Kowalski *et al*., 2006). با وجود این، در کشورهای کمتر توسعه‌یافته عدم دسترسی به غده‌های بذری با کیفیت مناسب، یک مشکل اساسی و همه‌گیر برای کشاورزان است (Tierno *et al*., 2014).

تولید انبوه غده‌های عاری از ویروس و دسترسی آسان به آن می‌تواند بخشی از هدررفت سیب‌زمینی در مزرعه را کاهش دهد. پس از مرحله‌ی تولید گلخانه‌ای، برای تولید انبوه غده‌های کلاس‌دار برای مصرف کشاورزان، ادامه کشت در مزرعه انجام می‌شود. از آنجایی که بوته سیب‌زمینی ریشه‌های سطحی و کوچکی دارد (Crusciol *et al*., 2009)، حساسیت شدیدی را به کمبود آبِ خاک نشان می‌دهند (Kawakami *et al*., 2006) و از سوی دیگر ساختمان خاک و توزیع آب در خاک بر رشد و توسعه ریشه گیاه تأثیر بسیاری دارند (Ahmadi *et al*., 2011a; Wang *et al*., 2006). همچنین دسترسی گیاه به مواد غذایی نیز به وضعیت ریشه در خاک بستگی دارد، ضمن این‌که حجم خاکی که ریشه‌ی گیاه برای دسترسی به موادغذایی (به‌خصوص عناصر غیرمتحرک) می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار دهد، تحت تأثیر عمق خاک و شدت ریشه‌دهی گیاه می‌باشد (Smit and Groenwold, 2005).

ساختار خاک به‌عنوان تعیین‌کننده میزان تخلخل، شاخص مناسبی برای تعیین الگوهای توسعه ریشه‌ای (به جای وزن مخصوص ظاهری

1- دانشجوی دکتری رشته اکولوژی گیاهان زراعی، گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
2- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
3- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
4- دانشیار، گروه صنایع چوب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
(* - نویسنده مسئول: Email: nezami@um.ac.ir)
DOI:10.22067/jcesc.2020.67434

و مقاومت مکانیکی) ذکر شده است (Asgarzadeh *et al.*, 2010; Dexter, 2004). مقدار بالای رس خاک به‌عنوان شاخص محدودکننده‌ی عمق ریشه عمل می‌کند و تراکم بالای ریشه در خاک‌های لومی ماسه‌ای به دلیل کمتر بودن مقاومت فیزیکی در مقابل رشد ریشه و مقدار مناسب رس در این خاک‌ها می‌باشد (Ahmadi *et al.*, 2011b).

خاک‌هایی با تراکم بالا رشد رویشی و تولید ریشه‌های ذخیره‌ای را کاهش می‌دهند، به طوری که سیب‌زمینی‌های شیرین (*Ipomea batatas*) رشدیافته در خاک‌های غرقاب و یا بوته‌های رشدیافته به صورت غرقاب در محلول غذایی، توانایی تولید ریشه‌های ذخیره‌ای را نداشتند (Lebot, 2009). مشخص شده است که سیب‌زمینی‌های کشت شده در خاک‌های لوم‌شنی، به‌طور معنی‌داری ریشه‌های بیشتری (حدود دوبرابر) در مقایسه با دیگر انواع خاک تولید کردند (Ahmadi *et al.*, 2008).

رس‌ها و نانورس‌ها به دلیل داشتن سطح مؤثر بالا (Ghormade *et al.*, 2011)، کمک به حفظ رطوبت خاک و بستر (Mura *et al.*, 2013)، قدرت تبادل کاتیونی بالا (Afzali *et al.*, 2010; Tuzen *et al.*, 2006) و از همه مهم‌تر قابلیت بازگشت بی‌خطر به خاک (Uddin, 2008)، در صنعت کشاورزی به‌عنوان مواد بهبوددهنده‌های بستر کاشت، به‌کار می‌روند. نانورس‌ها همچنین به‌عنوان یک اتصال‌دهنده در خاک عمل کرده و باعث حفظ رطوبت در خاک می‌شود و لذا به تأمین شرایط مناسب رطوبتی برای ریشه گیاه و امکان تداوم رشد و نمو آن‌ها در شرایط کمبود آب کمک می‌کنند (Mura *et al.*, 2013). گیاهانی که به‌طور معمول در خاک‌های غنی از مونت مورنولایت رشد می‌کنند، به دلیل وجود عناصر کم مصرف کافی، رشد سریع‌تری داشته، مزه بهتری دارند و به آفات و بیماری‌ها مقاوم‌ترند (Uddin, 2008).

سیلیکا (اکسید سیلیسیم (SiO_2)) اکسید غیرفلزی متشکل از سیلیسیم و اکسیژن است که به نوع کریستالین (کریستاله شده) و آمورف (بدون ساختار کریستالی) تقسیم می‌شود (Dekkers *et al.*, 2011). نانوسیلیکا از طریق افزایش جمعیت باکتری‌های مفید خاک و ارتقا وضعیت مواد غذایی در خاک باعث بهبود جوانه‌زنی ذرت شده است (Karunakaran *et al.*, 2013)، از طرفی بررسی‌ها بر روی اثرات گلخانه‌ای نانوسیلیکا بر روی ذرت‌های رشدیافته در گلخانه نیز نشان داد که افزودن نانوسیلیکا به خاک باعث افزایش عملکرد، وزن خشک گیاه و بلال، تعداد گره و طول میانگره در گیاه شد (Yuvakkumar *et al.*, 2011)، همچنین افزودن 15 کیلوگرم در هکتار نانوسیلیکا به خاک شنی لوم، باعث افزایش معنی‌دار ترکیبات آلی مانند پروتئین، کلروفیل و فنول‌های مفید در گیاه ذرت، در مقایسه با سیلیسم معمولی و تیمار شاهد شد (Suriyaprabha *et al.*, 2012).

هدف از این پژوهش، بررسی امکان بهبود بسترهای خاکی از طریق افزایش منابع سیلیسیمی و اثر آن بر روی خصوصیات گیاهان و غده‌های تولیدی سیب‌زمینی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد که فاکتور اول نوع خاک (رس لوم، لوم و لوم شنی) و فاکتور دوم تیمار مواد سیلیکاته (جدول 3) و شاهد تعیین شد.

خصوصیات مواد مورد استفاده

نانو رس: نانو رس (بنتونیت هیدروفیل) از شرکت سیگما_آلدریچ و با شماره محصول 682659 تهیه شد. فرمول این ترکیب $Si_6O_2Al_2H$ و وزن مولکولی آن 1/18 گرم بر مول است. فاصله بین لایه‌های آن 8/1 تا 2 نانومتر است. ترکیبات موجود در نانو رس که توسط XRF (Philips Analytical X-Ray B.V) تعیین شده، در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- آنالیز ترکیبات موجود در نانو رس به‌وسیله پراش پرتو ایکس
Table 1- XRF analysis of Nanoclay

نوع ماده Material	Fe_2O_3 %	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Na_2O %	MgO%	K_2O %	TiO_2 %	MnO %	CaO%	P_2O_5%
مقدار Amount	6.16	53.46	18.16	0.95	2.18	1.32	0.69	0.11	1.85	0.15
نوع ماده Material	LOI%	Ba(ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Mo (ppm)	Cl (ppm)	Zn (ppm)	SO_3 %
مقدار Amount	14.15	1270	9	92	72	50	17	22	64	0.58

جدول 2- آنالیز ترکیبات موجود در بنتونیت به‌وسیله پراش پرتو ایکس
Table 2- XRF analysis of Bentonite

نوع ماده Material	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Na_2O %	MgO%	K_2O %	TiO_2 %	MnO %	CaO%	P_2O_5 %	Fe_2O_3 %
مقدار Amount	43.62	10.15	1.67	3	0.43	0.45	0.11	11.27	0.09	3.04
نوع ماده Material	Ba(ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Mo (ppm)	Cl (ppm)	Zn (ppm)	SO_3 %	LOI%
مقدار Amount	187	2	40	N	95	10	4418	70	0.43	25.10

بنتونیت: بنتونیت به‌کار رفته از معدن بنتونیت چاه امیر (کد: 29100167) در خراسان جنوبی تهیه شد. سنگ بنتونیت پس از کوبیده شدن از الک‌های با مش 70 میکرون عبور داده شد. ترکیبات موجود در رس توسط XRF تعیین شده و در جدول 2 ارائه شده‌اند.
نانوسیلیکا: نانو سیلیکا (SiO_2) از شرکت نانوسا و با شماره محصول 20201SAV تهیه شد. این پودر آمورف و در سایز 20 تا 30 نانومتر در آب محلول است و دارای خلوص 98% می‌باشد.
سیلیکات‌سدیم: سیلیکات‌سدیم (Si_3O_2Na) با خلوص 96 درصد استفاده شد و چون پس از انحلال در آب کاملاً یونیزه می‌شود، سایر اندازه‌گیری‌های انجام شده بر مواد مصرفی دیگر، قابل انجام بر روی سیلیکات‌سدیم نبود.

آماده‌سازی تیمارها

در جدول 3 نحوه آماده‌سازی مواد سیلیکاته به‌کار رفته در این آزمایش توضیح داده شده است. برای افزایش جداسازی لایه‌ها و افزایش سطح تماس ماده مورد نظر تحت زمان‌های مختلف اولتراسونیک قرار گرفت و برای کاهش اثر لخته‌کنندگی سدیم، از تیمار اتانول استفاده شد (Wilson, 2007).

نوع خاک

خصوصیات و بافت خاک‌های مورد استفاده در این آزمایش در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 3- نحوه‌ی آماده‌سازی تیمارهای سیلیکاته و شاهد
Table 3- Silicate treatment preparation technique

نوع تیمار Treatment	نحوه‌ی آماده‌سازی Preparation technique
شاهد Control	استفاده از آب مقطر در زمان اعمال تیمار
نانورس (1000ppm) NanoNanoclay	یک گرم نانورس در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت.
نانورس (2000ppm)Nanoclay	دو گرم نانورس در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت.
بنتونیت (1000ppm) Bentonite	یک گرم رس بنتونیت در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه با شیکر در دور rpm1000 کاملاً مخلوط شد.
بنتونیت (2000ppm) Bentonite	دو گرم رس بنتونیت در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه با شیکر در دور rpm1000 کاملاً مخلوط شد.
نانوسیلیکا (1000ppm)Nanosilica	یک گرم نانوسیلیکا در یک لیتر آب مقطر که به مدت پنج دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت.
نانوسیلیکا (2000ppm) Nanosilica	دو گرم نانوسیلیکا در یک لیتر آب مقطر که به مدت پنج دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت.
سیلیکات‌سدیم Sodium Silicate (1000ppm)	یک گرم سیلیکات‌سدیم در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه با شیکر در دور rpm1000 کاملاً مخلوط شد.
سیلیکات‌سدیم Sodium Silicate (2000ppm)	دو گرم سیلیکات‌سدیم در یک لیتر آب مقطر به همراه نیم سی‌سی اتانول که به مدت پنج دقیقه با شیکر در دور rpm1000 کاملاً مخلوط شد.

جدول 4- خصوصیات و بافت خاک‌های مورد استفاده در آزمایش

Table 4- Soil properties and content of 3 different soils used in experiment

Soil texture بافت خاک	Silt سیلت (٪)	Sand شن (٪)	Clay رس (٪)	Organic carbon کربن آلی (٪)	K پتاسیم (٪)	P فسفر (٪)	N نیتروژن (٪)	Organic matter ماده آلی (٪)
Clay loam	42	28	30	0.176	0.018	0.0093	0.069	0.303
loam	29	53	18	0.234	0.024	0.0068	0.060	0.403
Loam sand	7	83	10	0.307	0.022	0.0083	0.078	0.478

نوع گیاه و روش‌های تیماردهی

در این آزمایش از مینی‌تیوبرهای رقم آگریا که از شرکت فناوران بـذر یکتـا خریـداری شـده بـود، اسـتفاده شـد. میـانگین وزن‌تـر مینی‌تیوبرهای خریداری شده هفت گرم بـوده و بـه مـدت 3 مـاه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد بـرای شکسـتن خـواب نگهـداری شـده بودند. مینی‌تیوبرها در هر گلـدان هفـت کیلـویی (در هـر گلـدان دو مینی‌تیوبر) کشت شدند و قبل از کشت در داخل هر گلدان یک دیواره پلاستیکی متحرک برای افزایش طـول گلـدان و خـاک‌دهـی بـدون آسیب زدن به ریشه تعبیه شد. دوبار خاک‌دهی 39 روز بعد از استقرار (برای تحریک غده‌دهی) و 59 روز بعد از استقرار (برای جلـوگیری از خوابیدن و نور دیدن غده‌ها) انجام شد. اولین تیماردهی مواد سیلیکاته (نانو و غیر نانو)، 10 روز پس از سبزشدن و اطمینان از استقرار کامـل آن‌ها انجام شده و به دلیل آبشویی مواد سیلیکاته، هر 30 روز یکبـار تکرار شد. هر دوره تیماردهی، 100 میلی‌لیتر از تیمار بـه هـر گلـدان اضافه شد.

در طی دوره رشد دمای روز و شب گلخانـه بـه‌ترتیـب 24±2 و 18± 2 تنظیم شده و رطوبت نسبی 40% بود. 90 روز پس از استقرار، گیاهان برداشت شده و صفاتی مانند سطح برگ، تعـداد بـرگ و وزن خشک آن‌ها، طول ساقه، قطـر بـزرگ، قطـر و حجـم مینـی‌تیـوبر و همچنین وزن‌تر و وزن خشک مینی‌تیوبر اندازه‌گیری شد.

آنالیز داده‌ها: برای تجزیه واریانس، آنالیز رگرسیون چندمتغیره استپ وایز، آزمون همبستگی و رسم نمودار دندوگرام از نرم‌افزارهـای Minitab (ver 16.2.2، 2010) و SAS (ver 9.3.1، 2005) و برای آنالیز تجزیه مسیر از نرم‌افزار Path (ver 1.0.7، 1390) استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر متقابل نوع خاک و مواد سیلیکاته (نـانو و غیرنـانو) بـر همـه صفات معنی‌دار بود (جدول 5 و 6).در این بررسـی در خـاک رس‌لـوم هیچ‌گونه گیاهی نتوانست رشد کند. برای اطمینان از عدم رشد گیاهان به دلیل اثر نوع خاک، گلدان‌ها در دو مرحله واکاری شدند که در هـر دو مرحله نیز گیاهچه‌ها بعد از 10 روز خشک شدند. حتی در زمانی‌که در مرحله دوم واکاری به جای غده از نشـاهای آمـاده اسـتفاده شـد، نشاها بعد از چند روز از بین رفتند. به نظر می‌رسد که وجود رس بالا و فشردگی خاک رس لـوم دلیـل اصـلی عـدم توسـعه ریشـه و مـرگ گیاهچه‌ها بوده است. ضعیف بودن ریشه‌های سیب‌زمینی عـلاوه بـر کاهش کاهش کارایی جذب مواد غذایی و آب، باعث حساسیت گیـاه به تنش خشکی و ساختار فشرده خاک می‌شـود (Vreugdenhil *et al.*,2011). از طرفی افزودن رس (بنتونیت) اضافی بـه برخـی انـواع خاک باعث کاهش اکسیژن خاک به دلیل حبس آب شده و در نهایت باعث کاهش رشد می‌شوند (Aghdak *et al*., 2010).

در بررسی اثر متقابل نوع خاک و مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر روی صفت تعداد برگ مشخص شد در خاک لـوم غیـر از تیمارهـای بنتونیـــت (ppm1000)، بنتونیـــت (ppm2000) و نانوســـیلیکا (ppm2000) که بـه‌ترتیـب 5/2 و 12 و 5/2 درصـد تعـداد بـرگ را افزایش داده بود، بقیه تیمارهای سیلیکاته (نانو و غیرنانو) تعداد برگ را کاهش دادند و بیشترین کاهش در تیمـار نـانورس (ppm1000) بـه مقدار 5/24 درصد مشاهده شد (جدول 7). در خاک لوم‌شنی نیز همـه مواد سیلیکاته باعث کاهش تعداد برگ نسـبت بـه شـاهد شـدند کـه بیشترین و کمترین کاهش به‌ترتیـب در تیمارهـای سـیلیکات‌سـدیم (ppm1000) و نانورس (ppm1000) و به‌ترتیـب 59 و 5/11 درصـد بود (جدول 7).

غیـر از تیمارهـای نانوسـیلیکا (ppm2000) و سـیلیکات‌سـدیم (ppm2000) که به‌ترتیب 6 و 5/13 درصد وزن خشک برگ را نسبت به شاهد افزایش دادند، بقیه مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در خاک لوم باعث کاهش وزن خشک برگ نسبت به شاهد شدند. بیشترین کاهش نیز در تیمار نانورس (ppm1000) و به مقدار 55 درصد بود (جدول 7). در خـاک لـوم‌شـنی نیـز دو تیمـار نانوسـیلیکا (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm1000) به‌ترتیب به مقدار 5/8 و 2/1 درصد وزن خشک برگ را نسبت بـه شـاهد افـزایش دادنـد. کـاربرد بقیـه مـواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) منجر به کاهش وزن خشک برگ شـد کـه بیشترین کاهش را کاربرد سیلیکات‌سدیم (ppm1000) و به مقدار 35 درصد داشت (جدول 7).

مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در خاک لوم باعث افـزایش سـطح برگ گیاهان تحت تیمار نسبت به شاهد شدند و فقط کاربرد نانورس (ppm1000) منجر به کـاهش سـطح بـرگ نسـبت بـه شـاهد شـد. بیشترین افزایش سطح برگ در تیمار نانوسـیلیکا (ppm2000) دیـده شد که 49 درصد بیشتر از شاهد بود (جدول 7). در خاک لوم‌شنی نیز غیر از تیمار بنتونیت (ppm1000) که حدود یک درصد سطح برگ را نسبت به شاهد کاهش داد، کاربرد سایر تیمارهـا منجـر بـه افـزایش سطح برگ نسـبت بـه شـاهد شـدند و بیشـترین افـزایش در تیمـار نانوسیلیکا (ppm1000) به مقدار 168 درصد به‌دست آمد (جدول 7).

جدول ٥- آنالیز واریانس صفات مورد بررسی اندام هوایی تحت تأثیر بافت خاک و کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو)

Table 5- Variance analysis of shoot properties of Minituber plants affected by soil and silicon application

منابع تغییر S.O.V	d.f	تعداد برگ Leaf no.	وزن خشک برگ Leaf dry weight	سطح برگ Leaf area	طول ساقه Stem height	وزن خشک اندام هوایی گیاه Shoot dry weight	نسبت وزن خشک غده‌های بذری گیاه به وزن خشک اندام هوایی Minituber dry weight/ shoot dry weight
خاک Soil	2	854.4**	8857144**	126410**	12277.1**	19.7**	448975**
مواد سیلیکاته Silicon	8	3.8**	59163**	2080**	123.7**	0.14**	1.02**
خاک×مواد سیلیکاته soil*silicon	16	3.6**	53961**	1628**	39.4**	0.09**	0.7**
خطا error	54	0.4	3313	41	5.2	0.006	0.07
Cv		10.5	9.1	9.2	9.5	8.6	19.01

(**,*, ns: Significantly different in 1 % and 5% of probability, and not Significantly different, respectively) ns، *، **: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ٦- آنالیز واریانس صفات مورد بررسی غده‌های بذری تحت تأثیر بستر کاشت و کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو)

Table 6- Variance analysis of Minituber properties affected by soil and silicon application

منابع تغییر S.O.V	df	میانگین قطر غده‌های بذری Minituber diameter	میانگین وزن‌تر غده‌های بذری Mean Minituber wet weight	میانگین حجم غده‌های بذری Mean Minituber volume	میانگین وزن خشک غده‌های بذری Mean Minituber dry weight	وزن‌تر کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber wet weight	حجم کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume
خاک Soil	2	6945.7**	1647.4**	1459.1**	58.9**	2097.3**	1808.1**
مواد سیلیکاته Silicon	8	29.5**	31.2**	26.5**	1.8**	53.1**	44.1**
خاک×مواد سیلیکاته Soil*Silicon	16	26.2**	33.07**	32.04**	1.2**	19.7**	20.1**
خطا Error	54	7.7	1.8	0.83	0.04	3.07	1.9
Cv		14.9	15.2	10.8	12.7	17.3	14.8

(**,*, ns: Significantly different in 1 % and 5% of probability, and not Significantly different, respectively) ns، *، **: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

در بررسی اثر متقابل نوع خاک و مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر روی طول ساقه مشاهده شد که در خاک لوم، تیمارهای سیلیکاته (نانو و غیرنانو) افزایش طول ساقه را نسبت به شاهد به دنبال داشت. با وجود این کاربرد نانورس (ppm1000) منجر به کاهش 22 درصدی طول ساقه نسبت به شاهد شد. بیشترین افزایش طول ساقه نسبت به شاهد نیز در تیمار بنتونیت (ppm2000)، به مقدار 37 درصد دیده شد (جدول 7). در خاک لوم‌شنی نیز مانند خاک لوم، کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) باعث افزایش طول ساقه نسبت به شاهد شد و فقط تیمار نانورس (ppm1000) باعث کاهش طول ساقه (20 درصد) نسبت به شاهد شد. در این خاک تیمار نانوسیلیکا (ppm1000) بیشترین افزایش طول ساقه (47 درصد) را نسبت به شاهد داشت (جدول 7).

افزایش طول ساقه، در کنار کاهش تعداد و وزن خشک برگ و افزایش سطح برگ، نشان‌دهنده‌ی تغییر ساختار کانوپی در حضور مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در این دو نوع خاک است. تحقیقات نشان داده‌اند که در صورت عدم وجود تنش، عملکرد سیب‌زمینی، رابطه همسویی با میزان نور دریافتی توسط اندام‌های هوایی گیاه دارد (Schittenhelm *et al.*, 2006). همچنین افزودن سیلیسیم با افزایش غلظت رنگدانه‌ها باعث افزایش فتوسنتز در سیب‌زمینی می‌شود (Pilon *et al.*, 2013).

بررسی اثر متقابل نوع خاک و مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر روی وزن خشک اندام هوایی نشان داد که در خاک لوم، تیمارهای نانوسیلیکا (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm1000) هر دو باعث افزایش 11 درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شدند، در حالی‌که دیگر تیمارها وزن خشک نسبت به شاهد کاهش داشت و بیشترین کاهش در تیمار نانورس (ppm1000) دیده شد (جدول 7). در خاک لوم شنی تیمارهای نانورس (ppm1000)، بنتونیت (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm1000) باعث کاهش 10 درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شدند، تیمارهای بنتونیت (ppm2000)، نانوسیلیکا (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm2000) باعث افزایش 18 درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شدند (جدول 7).

اثر متقابل نوع خاک و مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر روی نسبت وزن خشک غده‌های بذری به وزن خشک اندام هوایی باعث افزایش این نسبت در همه مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در هر دو نوع خاک در مقایسه با شاهد شد. در خاک لوم بیشترین و کمترین افزایش به‌ترتیب در تیمار بنتونیت (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm2000) به‌ترتیب با 190 و 50 درصد و در خاک لوم‌شنی دو تیمار بنتونیت (ppm1000) و نانوسیلیکا (ppm1000) هردو با 175 درصد، بیشترین افزایش این نسبت را در مقایسه با شاهد داشتند، در حالی‌که نانوسیلیکا (ppm1000) با افزایش 58 درصدی این صفت کمترین مقدار افزایش این نسبت را در خاک لوم شنی داشت (جدول 7). این نسبت برای سیب‌زمینی نشان‌دهنده‌ی تخصیص منابع در شاخساره و اندام اقتصادی گیاه و نحوه‌ی انتقال منابع آسیمیلاتی بین مخزن و منابع است (Lemoine *et al.*, 2013). تغییر این صفت مستلزم تغییر هم‌زمان کارایی اندام‌های هوایی شامل برگ و ساقه و تغییر زمان تشکیل استولن و مکان تشکیل غده‌هاست. افزایش رشد و عملکرد گیاه در حضور سیلیسیم در نتیجه بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه قبلاً تایید شده است (Samuels *et al.*, 1993)، همچنین بررسی‌های تکمیلی زمان تشکیل ریزغده نشان داد که در حضور سیلیسیم، ریزغده‌ها زودتر از بوته‌های سیب‌زمینی تیمار نشده با سیلسیم، تشکیل می‌شوند (Soltani, 2018).

کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در خاک لوم باعث افزایش میانگین قطر غده‌های بذری نسبت به تیمار شاهد شد. کمترین و بیشترین افزایش به‌ترتیب در تیمارهای نانورس (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm2000)، به مقدار 22 و 5/70 درصد افزایش نسبت به شاهد دیده شد (جدول 8). در خاک لوم‌شنی نیز غیر از تیمار بنتونیت (ppm1000) که 20 درصد میانگین قطر غده‌های بذری را نسبت به شاهد کاهش داد، بقیه تیمارها میانگین قطر غده‌های بذری را نسبت به شاهد افزایش دادند. بیشترین افزایش میانگین قطر غده‌های بذری در خاک لوم‌شنی در تیمار بنتونیت (ppm2000) با 26 درصد افزایش نسبت به شاهد ثبت شد (جدول 8).

در خاک لوم میانگین وزن‌ترغده‌های بذری در همه تیمارهای مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) نسبت به شاهد افزایش داشت که بیشترین و کمترین افزایش در تیمارهای سیلیکات‌سدیم (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm1000) به‌ترتیب با 300 و 103 درصد افزایش نسبت به شاهد دیده شد (جدول 8). در خاک لوم‌شنی نیز تیمارهای مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) باعث رشد میانگین وزن‌تر غده‌های بذری نسبت به شاهد شدند، فقط در تیمار رس (ppm1000) به مقدار 18 درصد این میانگین نسبت به شاهد کاهش داشت. مقدار افزایش در تیمارهای مواد سیلیکاته در این خاک غالباً کمتر از افزایش در خاک لوم بود. بیشترین افزایش نیز در تیمارهای بنتونیت (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm2000) به مقدار 99 درصد دیده شد (جدول 8).

در خاک لوم میانگین حجم غده‌های بذری تحت تأثیر مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت به‌طوری که این افزایش از 71 درصد در تیمار نانوسیلیکا (ppm1000) تا 240 درصد در تیمارهای بنتونیت (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm2000) متغیر بود (جدول 8).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر ویژگی‌های اندام هوایی سیب‌زمینی

Table 7- Soil and silicon application interaction effects on shoot properties

نوع خاک Soil type	نوع تیمار Silicon source	تعداد برگ Leaf no.	وزن خشک برگ (mg) Leaf dry weight	سطح برگ (cm^2) Leaf area	طول ساقه (cm) Stem height	وزن خشک اندام هوایی (g) Shoot dry weight	نسبت وزن خشک غده‌های بذری گیاه به وزن خشک اندام هوایی Minituber dry weight/ shoot dry weight
لوم Loam	Control شاهد	11abc	1220abc	119.5d	36.4c-e	1.8ab	1g
	نانورس (1000ppm) Nanoclay	8.3def	669.7hi	67.4fg	28.4fg	1g	2.5a-d
	نانورس (2000ppm) Nanoclay	8.7def	1049.2cd	120.1d	42.7bc	1.6bc	1.7d-g
	بنتونیت (1000ppm) Bentonite	11.3ab	964.3de	130.5cd	45.5ab	1.6bc	2.4b-e
	بنتونیت (2000ppm) Bentonite	12.3a	1154.3bc	177.1a	50a	1.8ab	2.9ab
	نانوسیلیکا (1000ppm) Nanosilica	11abc	1080.2cd	126.8d	41.3bcd	1.7bc	2.2b-e
	نانوسیلیکا (2000ppm) Nanosilica	11.3ab	1297.6ab	177.8a	41.4bcd	2a	1.5e-g
	سیلیکات‌سدیم (1000ppm) Sodium Silicate	10bcd	1212abc	148bc	38.7b-e	1.7bc	1.9c-f
	سیلیکات‌سدیم (2000ppm)Sodium Silicate	9.3b-e	1384.2a	163.8ab	38.6b-e	2a	1.9c-f
لوم شنی Loam sand	control شاهد	11.3ab	840.4e-h	43.7h	25.4gh	1.1efg	1.2fg
	نانورس (1000ppm) Nanoclay	10bcd	739fgh	76.8ef	20.4h	1fg	1.8c-f
	نانورس (2000ppm) Nanoclay	9.3b-e	778fgh	53.8gh	35ef	1.1efg	2.4b-d
	بنتونیت (1000ppm) Bentonite	8.7def	787.1e-h	43.3h	32.6e-g	1fg	3.3a
	بنتونیت (2000ppm) Bentonite	9c-e	849.7e-h	71efg	37.2c-f	1.3ef	2.6a-c
	نانوسیلیکا (1000ppm)Nanosilica	9.7b-e	921.7def	117.5d	37.3cde	1.3ef	1.9c-f
	نانوسیلیکا (2000ppm) Nanosilica	8.3def	736ghi	91.4e	34ef	1.1fg	3.3a
	سیلیکات‌سدیم (1000ppm) Sodium Silicate	6.7f	553i	71.2efg	33.7ef	1g	2.9ab
	سیلیکات‌سدیم (2000ppm) Sodium Silicate	7.7ef	859.7e-g	82ef	33.8ef	1.3ef	2.3b-e

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن (در سطح ۵٪) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. Means in each column with the same letters are not significantly different

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) بر غده‌های بذری

Table 8- Soil and silicon application interaction effects on Minituber properties

نوع خاک Soil type	نوع تیمار Silicon source	میانگین قطر غده‌های بذری Minituber diameter (mm)	میانگین وزن‌تر غده‌های بذری Mean Minituber wet weight (g)	میانگین حجم غده‌های بذری Mean Minituber volume (cm^3)	میانگین وزن خشک غده‌های بذری Mean Minituber dry weight (g)	وزن‌تر کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber wet weight (g)	حجم کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume (cm^3)
لوم Loam	Control شاهد	19.7d	5.5i	5.9i	1h	9.5ef	9fg
	نانورس (1000ppm) Nanoclay	24.1bcd	14.4b-f	13.3cd	2.2def	10.8def	10.7efg
	نانورس (2000ppm) Nanoclay	28.1a-d	12.3efg	11.9def	2.6cd	13.6c-f	13.2c-f
	بنتونیت (1000ppm) Bentonite	29.9ab	18.8ab	20.1a	3.6a	18.7abc	19ab
	بنتونیت (2000ppm) Bentonite	27.9a-d	12.9d-g	11.2d-g	2.7bcd	23a	21.2a
	نانوسیلیکا (1000ppm) Nanosilica	28.2a-d	11.2f-h	10.1e-h	1.8e-g	17bc	16.3bcd
	نانوسیلیکا (2000ppm) Nanosilica	30.8ab	16.8bcd	15.3bc	3.3ab	14.8cde	12.3def
	سیلیکات‌سدیم (1000ppm) Sodium Silicate	30.2ab	16.5b-e	13.7bcd	3.1a-c	16.6c	13.6cde
	سیلیکات‌سدیم (2000ppm) Sodium Silicate	33.6a	22a	20.1a	3.7a	22.3ab	20ab
لوم شنی Loam sand	Control شاهد	26a-d	8.7ghi	8.5ghi	1.4gh	8.4f	7.8g
	نانورس (1000ppm) Nanoclay	26.4a-d	10.5fgh	9.6fgh	1.7fgh	10.9def	9.1fg
	نانورس (2000ppm) Nanoclay	28.4a-d	12.2efg	12.9cde	2.5cde	13.2c-f	13.7cde
	بنتونیت (1000ppm) Bentonite	20.8cd	7.1hi	7.4hi	1.3gh	16.8bc	17abc
	بنتونیت (2000ppm) Bentonite	32.7ab	17.2bcd	15.4bc	3.3ab	17.2bc	14.6cde
	نانوسیلیکا (1000ppm) Nanosilica	30.4ab	13.2c-f	13cd	2.9bc	13.2c-f	12.3def
	نانوسیلیکا (2000ppm) Nanosilica	26.7a-d	17.3bc	16.3b	3.4ab	17.2bc	16.8abc
	سیلیکات‌سدیم (1000ppm) Sodium Silicate	27.5a-d	12fg	12def	2.5c-e	13.9c-f	13.3c-f
	سیلیکات‌سدیم (2000ppm) Sodium Silicate	28.7abc	12.4efg	11d-g	2.6cd	15.5cd	13.6cde

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن (در سطح ۵٪) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. Means in one column with same letters are not significantly different(5% of probability).

در خاک لوم‌شنی غیر از تیمار بنتونیت (ppm1000) که باعث کاهش میانگین حجم غده‌های بذری به مقدار 13 درصد نسبت به شاهد شد، بقیه مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) این مقدار را نسبت به شاهد افزایش دادند و بیشترین افزایش نیز در تیمار نانوسیلیکا (ppm2000)، به مقدار 91 درصد دیده شد (جدول 8).

کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در خاک لوم، وزن خشک غده‌های بذری را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داد. این افزایش بین 80 تا 170 درصد، در تیمارهای نانوسیلیکا (ppm1000) و سیلیکات‌سدیم (ppm2000) متغیر بود (جدول 8). در خاک لوم‌شنی نیز کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) باعث بهبود میانگین وزن خشک غده‌های بذری نسبت به شاهد شد و فقط در تیمار بنتوونیت (ppm1000) کاهش 7 درصدی این صفت نسبت به شاهد دیده شد. تغییر مثبت دیگر تیمارها در این خاک کمتر از خاک لوم بود و بین 21 تا 142درصد در تیمارهای نانورس (ppm1000) و نانوسیلیکا (ppm2000) ثبت شد (جدول 8).

مجموع وزن‌تر کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه، در هر دو خاک لوم و لوم‌شنی بر اثر کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشتند، به‌طوری‌که این افزایش در برخی موارد به بیش از دوبرابر رسید. در خاک لوم، تیمار بنتونیت (ppm2000) و در خاک لوم‌شنی تیمار نانوسیلیکا (ppm2000) به‌ترتیب 142 و 107 درصد، مجموع وزن‌تر کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه را نسبت به شاهد افزایش دادند که بیشترین مقدار افزایش این صفت بین تیمارهای مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) در هر خاک بود. کمترین افزایش در خاک لوم و لوم شنی نیز در تیمار نانورس (ppm1000) به‌ترتیب به مقدار 5/13 و 30 درصد مشاهده شد (جدول 8).

در خاک لوم همه مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو)، حجم کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه را نسبت به شاهد افزایش دادند. کمترین افزایش در تیمار نانورس (ppm1000) و بیشترین افزایش در تیمار بنتونیت (ppm2000)، به‌ترتیب به مقدار 19 و 135 درصد ثبت شد (جدول 8). در خاک لوم‌شنی نیز حجم کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه پس از کاربرد مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) نسبت به شاهد بهبود یافت. در این خاک نیز کمترین افزایش در تیمار نانورس (ppm1000) و بیشترین افزایش در تیمار بنتونیت (ppm1000)، به‌ترتیب به مقدار 5/28 و 157 درصد مشاهده شد (جدول 8).

افزایش همه خصوصیات غده‌های بذری در حضور مواد سیلیکاته (نانو و غیرنانو) نسبت به شاهد بیانگر بهبود شرایط تولید عملکرد در حضور سیلیسیم است که می‌تواند به دو علت بهبود شرایط گیاه و بهبود ساختار خاک باشد. در رابطه با بهبود ساختار گیاه می‌توان به توانایی گیاه برای تولید مخزن بزرگتر به دلیل فشار تورگر بیشتر (Yin *et al.*, 2013)، افزایش سطح برگ و طول ساقه و در نتیجه شاخساره کاراتر (Gong *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2008) سیستم ریشه‌ای بزرگتر و جذب مواد غذایی بیشتر (Ma and Yamaji, 2008) درحضور سیلیسیم در گیاه اشاره کرد. همچنین با افزودن انواع رس‌ها به خاک به دلیل تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها (Suzuki, 2004)، تشکیل حفره‌های ریز در خاک‌های دارای شن نسبت به حفره‌های درشت افزایش معنی‌داری می‌یابند (Hassan and AbdelWahab, 2013)، که باعث کمک به نگهداری آب و در نهایت افزایش ظرفیت زراعی خاک و بهبود آب در دسترس گیاه می‌شود (Satjeand Nelson, 2009). از برآیند بهبود شرایط خاک و گیاه، بهبود تولید و توسعه غده‌ها حاصل می‌شود و البته از دیدگاه دیگر در مقایسه دو خاک می‌توان گفت بزرگتر بودن غده‌های بذری خاک لوم به دلیل بزرگتر بودن منبع تولیدی مواد کربوهیدراتی به دلیل توسعه مناسب اندام‌های فتوسنتزکننده یعنی برگ و ساقه و در نتیجه افزایش قدرت منبع بوده است (White *et al.*, 2015).

آنالیز کلاستر صفات اندازه‌گیری شده گیاهان در خاک لوم، تیمارهای سیلیکاته را در سه گروه اصلی گروه اول: شاهد، نانورس (ppm2000)، نانوسیلیکا (ppm1000)، بنتونیت (ppm1000)، گروه دوم: نانورس (ppm1000) و گروه سوم: بنتونیت (ppm1000)، نانوسیلیکا (ppm2000)، سیلیکات سدیم (ppm1000)، سیلیکات سدیم (ppm2000) طبقه‌بندی کرد (شکل 1).

همچنین صفات گیاهان در خاک لوم‌شنی، تیمارهای سیلیکاته را در چهار گروه اصلی گروه اول: شاهد، بنتونیت (ppm1000)، نانورس (ppm1000)، گروه دوم: نانورس (ppm2000)، نانوسیلیکا (ppm2000)، نانوسیلیکا (ppm1000)، گروه سوم: بنتونیت (ppm2000)، سیلیکات‌سدیم (ppm2000) و در نهایت گروه چهارم: سیلیکات‌سدیم (ppm1000)، توسط آنالیز کلاستر گروه‌بندی شدند (شکل 2).

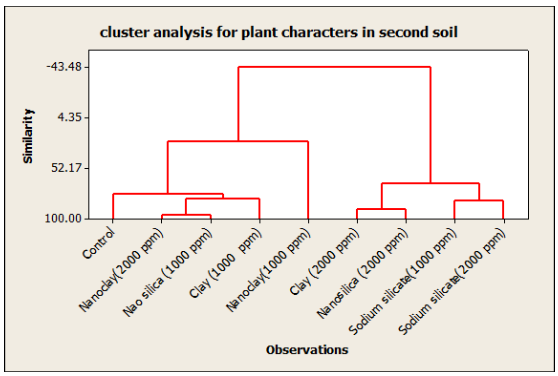
در آنالیز رگرسیون چند متغیره استپ وایز برای متغیر وزن‌ترغده‌های بذری به‌عنوان عملکرد قابل فروش غده‌های بذری، سه صفت وزن خشک برگ، حجم کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه و وزن خشک غده‌های بذری یک گیاه بالاترین همبستگی معنی‌دار را در خاک لوم با وزن‌ترغده‌های بذری داشتند (جدول 9).

پس از آنالیز تجزیه علیت صفات در آنالیز رگرسیون چند متغیره، اثرات مستقیم و غیر مستقیم هر کدام بر روی وزن‌تر غده‌های بذری در خاک لوم اندازه‌گیری شد. تغییرات این سه صفت به تنهایی 85 درصد از تغییرات وزن‌تر غده‌های بذری را توجیه می‌کند (جدول 9). بر اساس نتایج تجزیه علیت، وزن خشک غده‌های بذری و حجم کل غده‌های بذری بیشترین اثر مستقیم را داشت و اثر مستقیم وزن خشک برگ بر روی وزن‌تر غده‌های بذری ناچیز بود (جدول 9). در

بین اثرات غیر مستقیم نیز اثر تغییر وزن خشک کل غده‌های بذری از طریق تغییر حجم کل غده‌های بذری و برعکس بالاترین اثرات غیر مستقیم بر تغییر وزن‌ترغده‌های بذری را داشت و دیگر اثرات غیر مستقیم قابل چشم‌پوشی بودند (جدول 9).

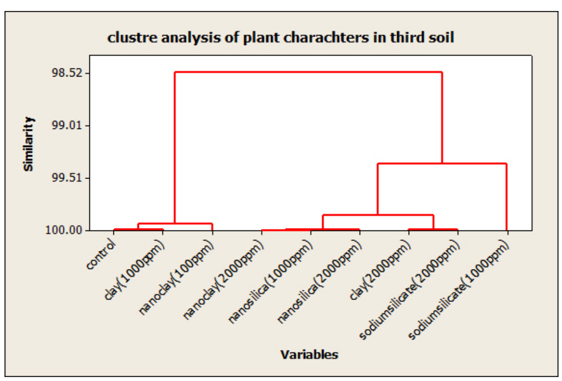
در آنالیز رگرسیون چند متغیره استپ وایز برای متغیر وزن‌تر غده‌های بذری به‌عنوان عملکرد قابل فروش، چهار صفت سطح برگ، میانگین قطر غده‌های بذری، حجم کل غده‌های بذری تولیدی گیاه و وزن خشک کل غده‌های بذری تولیدی در یک گیاه بالاترین همبستگی معنی‌دار را با عملکرد نشان دادند (جدول 10). صفات با همبستگی معنی‌دار تعیین شده در تجزیه استپ وایز، برای بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر روی تغییرات وزن‌تر غده‌های بذری مورد استفاده قرار گرفت که در کل این چهار صفت 99 درصد از تغییرات وزن‌تر غده‌های بذری را توجیه کردند (جدول 10).

در بین اثرات مستقیم، اثر مستقیم تغییر حجم کل غده‌های بذری و وزن خشک غده‌های بذری بیشترین اثر را بر روی وزن‌تر غده‌های بذری داشتند و دیگر اثرات مستقیم قابل چشم‌پوشی بود (جدول 10). در اثرات غیر مستقیم نیز تغییر حجم غده‌های بذری از طریق تغییر سه صفت دیگر بر روی وزن‌تر غده‌های بذری و تغییر وزن خشک غده‌های بذری از طریق سه صفت دیگر بر روی وزن‌تر غده‌های بذری قابل توجه بود و دیگر اثرات غیر مستقیم قابل چشم‌پوشی بودند (جدول 10).



شکل 1- آنالیز کلاستر اثر تیمارهای اعمال شده بر روی صفات اندازه‌گیری شده در خاک لوم

Figure 1- Cluster analysis of the effect of applied treatments on the measured traits in loam soil



شکل 2- آنالیز کلاستر اثر تیمارهای اعمال شده بر روی صفات اندازه‌گیری شده در خاک لوم‌شنی

Figure 2- Cluster analysis of the effect of applied treatments on the measured traits in sandy loam soil

جدول 9- اثرات مستقیم و غیرمستقیم صفات انتخاب شده در آنالیز رگرسیون چند متغیره بر روی وزن‌تر غده‌های بذری در خاک لوم
Table 9- Direct and indirect effect of plant and Minituber properties change on Minituber wet weight in loam soil

	همبستگی Correlation	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیر مستقیم Indirect effect		
			وزن خشک برگ Leaf dry weight	حجم کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume	وزن خشک غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume
وزن خشک برگ Leaf dry weight	0.26**	0.10	-	0.021	0.014
حجم کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume	0.96**	0.38	0.076	-	0.36
وزن خشک غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber dry weight	0.97**	0.59	0079	0.56	-
residue: 0.156					

ns,*,**: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد

**,*, ns: respectively significantly different in 1 % and 5% of probability, and not significantly different

جدول 10- اثرات مستقیم و غیر مستقیم صفات انتخاب شده در آنالیز رگرسیون چند متغیره بر روی وزن‌تر غده‌های بذری در خاک لوم شنی
Table 10- Direct and indirect effect of plant and Minituber properties change on Minituber wet weight in loamsand soil

	همبستگی Correlation	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیر مستقیم indirect effect			
			میانگین قطر غده‌های بذری Mean Minituber diameter	سطح برگ Leaf erea	حجم کل غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber volume	وزن خشک غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber dry weight
میانگین قطر غده‌های بذری Mean Minituber diameter	0.63**	0.08	-	0.03	0.045	0.047
سطح برگ Leaf erea	0.37*	0.04	0.022	-	0.013	0.016
حجم کل مینی تیورهای یک گیاه Plant Minituber volume	0.97**	0.46	0.25	0.12	-	0.44
وزن خشک غده‌های بذری یک گیاه Plant Minituber dry weight	0.98**	0.48	0.27	0.16	0.46	-
residue : 0.09						

ns,*,**: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد

**,*, ns: respectively significantly different in 1 % and 5% of probability, and not significantly different

نتیجه‌گیری

با مقایسه صفت‌های با همبستگی بالا با وزن‌تر غده‌های بذری در خاک لوم که از تجزیه رگرسیون استپ وایز بـه‌دسـت آمـده و اثـرات مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها حاصل از تجزیه علیت و کلاستر با جدول میانگین اثرات متقابل خاک و تیمار مشاهده می‌شود که در صفت‌های

حجم کل غده‌های بذری تولیدی در گیاه و وزن خشک کل غده‌های بذری تولیدی در گیاه، تیمار بنتونیت (ppm2000) بهترین عملکرد را داشت. در صفت وزن خشک برگ تیمار سیلیکات‌سدیم (ppm2000) بالاترین وزن را تولید کرده بود (جدول‌های 7 و 9، شکل 1). با توجه به ناچیز بودن اثرات مستقیم و غیرمستقیم وزن خشک برگ نسبت به دو صفت دیگر بر روی وزن‌تر غده‌های بذری می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در خاک لوم، بنتونیت (ppm2000) بهترین تیمار برای افزایش وزن‌تر غده‌های بذری می‌باشد.

مقایسه صفت‌هایی با همبستگی بالا با عملکرد حاصل از تجزیه رگرسیون استپ وایز و تجزیه علیت با جدول اثرات متقابل خاک با تیمار و آنالیز خوشه‌ای در خاک لوم‌شنی، نشان داد که بالاترین حجم کل غده‌های بذری تولیدی گیاه در تیمارهای بنتونیت (ppm1000)، بنتونیت (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm2000)حاصل شده است و بالاترین وزن خشک کل غده‌های بذری نیز در همین سه تیمار تولید شد. بالاترین قطر غده‌های بذری در تیمارهای بنتونیت (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm1000) بود و بیشترین سطح برگ را نیز تیمارهای نانوسیلیکا (ppm1000) و نانوسیلیکا (ppm2000) داشتند (جدول‌های 7، 8 و 10، شکل 2).

تیمارهای بنتونیت (ppm2000) و نانوسیلیکا (ppm2000) در دو صفت اصلی با اثر مستقیم بالا بر روی عملکرد وزن‌تر غده‌های بذری مشترک بودند، اما با توجه به این‌که اثرات مستقیم و غیر مستقیم و همبستگی صفت میانگین قطر غده‌های بذری بیشتر از سطح برگ بر روی عملکرد است و بنتونیت (ppm2000) در میانگین قطر غده‌های بذری هم تولید مناسبی داشت، می‌توان نتیجه گرفت در خاک لوم‌شنی تیمار بنتونیت (ppm2000) بهترین تیمار بوده است.

References

1. Aghdak, P., Mobli, M., Khoshgoftarmanesh, A. H., and Shakeri, F. 2010. Effects of adding Bentonite to different substrates on vegetative growth and yield of snap beans (*Phaseulus vulgaris* L.). Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 1: 31-41.
2. Ahmadi, S., Andersen, M. N., Lærke, P. E., Plauborg, F., Sepaskhah, A., Jensen, C. R., and Hansen, S. 2011a. Interaction of different irrigation strategies and soil textures on the nitrogen uptake of field grown potatoes.International Journal of Plant Production 5: 263-274.
3. Ahmadi, S. H., Andersen, M. N., and Plauborg, F. 2008. Potato root growth and distribution under three soil types and full, deficit and partial root zone drying irrigations. Plant and Soil 206: 123-136.
4. Ahmadi, S. H., Plauborg, F., Andersen, M. N., Sepaskhah, A. R., Jensen, C. R., and Hansen, S. 2011b. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Root distribution. Agricultural Water Management 98: 1280-1290.
5. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., and Dexter, A. R. 2010.Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant and Soil 335: 229-244.
6. Crusciol, C. A. C., Pulz, A. L., Lemos, L. B., Soratto, R. P., and Lima, G. P. P. 2009. Effects of Silicon and Drought Stress on Tuber Yield and Leaf Biochemical Characteristics in Potato. Crop Science 49.
7. Dexter, A. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma 120: 201-214.
8. Karunakaran, G., Suriyaprabha, R., Manivasakan, P., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Prabu, P., and Kannan, N. 2013. Effect of Nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. IET Nanobiotechnology **7**: 70-77.
9. Kawakami, J., Iwama, K., and Jitsuyama, Y. 2006. Soil water stress and the growth and yield of potato plants grown from microtubers and conventional seed tubers. Field Crops Research 95: 89-96.
10. Kowalski, B., Terry, F., Herrera, L., and Peñalver, D. 2006. Application of Soluble Chitosan in vitro and in the Greenhouse to Increase Yield and Seed Quality of Potato Minitubers. Potato Research 49: 167-176.
11. Lebot, V. 2009."Tropical Root and Tuber Crops: Cassava, Sweet Potato, Yams and Aroids," CABI, No.17.
12. Lemoine, R., La Camera, S., Atanassova, R., Dédaldéchamp, F., Allario, T., Pourtau, N., Bonnemain, J.-L., Laloi, M., Coutos-Thévenot, P., and Maurousset, L. 2013. Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors.Frontiers in Plant Science 4: 2.
13. Mura, S., Seddaiu, G., Bacchini, F., Roggero, P. P., and Greppi, G. F. 2013. Advances of Nanotechnology in agro-environmental studies.Italian Journal of Agronomy 8: 18.
14. Pilon, C., Soratto, R. P., and Moreno, L. A. 2013. Effects of Soil and Foliar Application of Soluble Silicon on Mineral Nutrition, Gas Exchange, and Growth of Potato Plants. Crop Science 53: 1605-1614.
15. Samuels, A., Glass, A., Ehret, D., and Menzies, J. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: changes in surface characteristics. Annals of Botany 72: 433-440.
16. Satje, A., and Nelson, P. 2009. Bentonite treatments can improve the nutrient and water holding capacity of sugarcane soils in the wet tropics. Proc. Australian Soc. Sugar Cane Technol 31: 166-176.

17. Sieczka, J. B., Thornton, R. E., and Chase, R. 1992. Commercial potato production in North America. Potato Association of America handbook (USA).
18. Singh, P. R., Valkonen, T. J. P., Gray, M. S., Boonham, N., Jones, C. R. A., Kerlan, C., and Schubert, J. 2008. Discussion paper: The naming of Potato virus Y strains infecting potato. Archives of Virology 153: 1-13.
19. Smit, A. L., and Groenwold, J. 2005. Root characteristics of selected field crops: Data from the Wageningen Rhizolab (1990-2002). Plant and Soil 272: 365-384.
20. Soltani, M. 2018. Potato mini tuber production improvement by enhancing the different greenhouse sowing bed conditions and soil with Nano-clay, clay and silicon, PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Agriculture department.
21. Tierno, R., Carrasco, A., Ritter, E., and de Galarreta, J. I. R. 2014. Differential Growth Response and Minituber Production of Three Potato Cultivars under Aeroponics and Greenhouse Bed Culture. American Journal of Potato Research 91: 346-353.
22. Vreugdenhil, D., Bradshaw, J., Gebhardt, C., Govers, F., Taylor, M. A., MacKerron, D. K., and Ross, H. A. 2011. "Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives: Advances and Perspectives," Elsevier, ISBN: 0080525059.
23. Wang, F.-X., Kang, Y., and Liu, S.-P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. Agricultural Water Management 79: 248-264.
24. White, A. C., Rogers, A., Rees, M., and Osborne, C. P. 2015. How can we make plants grow faster? A source–sink perspective on growth rate. Journal of Experimental Botany.
25. Wilson, M. J. 2007. Handbook of Clay Science, F. Bergaya, B. K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.). Elsevier, Amsterdam. 2006, ISBN: 978-0-08-044183-2 (book review). Geoderma 139: 420-421.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 2, Summer. 2021, p. 107-120

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 19، شماره 2، تابستان 1400، ص. 120-107

Effects of Silicon Application at Nano and Micro Scales on the Growth and Production of Potato Minitubers (*Solanum tuberosum* Var. Agria) under Three Soil Texture

M. Soltani[1], M. Kafi[1], A. Nezami[1*], H. R. Taghiyari[2]

Received: 16-09-2017
Accepted: 25-04-2018

Introduction: Many experiments have shown that Silicon (Si) can reduce the effect of both biotic and abiotic stresses in plants caused by plant diseases, pest damage, salinity, drought, heavy metal toxicity, nutrient imbalance, water logging, high radiation, high temperature, wounding, and freezing. It has been indicated that silicon has a beneficial role in plant nutrition such as enhancement in absorbing nitrogen, phosphor, potassium and zinc. Beneficial results of silicon application on plant growth and physiology made farmers and researches to use silicon as a fertilizer. Silicon fertilizers are applied as slag, compost, rice straw, calcium and sodium silicates in both foliar and soil applications. Potato is not considered as a Si-accumulating but studies have implied that Si supply may alleviate damaging effects that result from drought and also reduce stem lodging and increase tuber yield increased leaf area, specific leaf area, and pigment concentration (chlorophyll a and carotenoids) as well as photosynthesis and transpiration rates of well watered potato plants.

Materials and Methods: This experiment was conducted as factorial based on completely randomized design with three replications, in department of agronomy, Ferdowsi university of Mashhad, Iran, in 2015. In this research, the effects of four different silicon compounds (Nano-silica, sodium silicate, hydrophilic Bentonite (Nano-clay), and Bentonite), in two concentrations (1000 ppm and 2000 ppm) on the growth characteristics of potato Minitubers (*Solanum tuberosum* Var. Agria) plants and production under three different soil texture (clay loam, loam and sandy loam), were investigated. In order to determine the best treatment in each soil, variance analysis was done along with cluster analysis, stepwise multi regression analysis and path analysis, and the results of all analysis were compared.

Results and Discussion: Due to the lack of development of plants in clay loam soil, the comparison between treatments was done only in loam soils and sandy loam soils. The results showed that despite the lack of leaf and stem development in silicon treated plants, the Minituber characteristics improved compared to the control, which resulted in an increase in the ratio of Minituber dry weight to shoot dry weight.

based on plant performance, Cluster analysis for loam soil categorized silicate treatments in 3 groups: first (control, Bentonite (2000 ppm), Nano-silica (2000 ppm)), second (Nano-clay (1000 ppm), Bentonite (1000 ppm), Nano-silica (1000 ppm)) and third (Nano-clay (1000 ppm), Sodium Silicate (1000 ppm), Sodium Silicate (2000 ppm)). In loam sand soil this grouping was in four groups: first (control, Bentonite (1000 ppm), Nano-clay (1000 ppm)), second (Nano-clay (2000 ppm), Nano-silica (2000 ppm), Nano-silica (1000 ppm)), third (Bentonite (2000 ppm), Sodium Silicate (2000 ppm)) and forth (Sodium Silicate (1000 ppm)).

Path analysis showed in loam soil three traits (leaf dry weight, total plant Minituber volume, total plant Minituber dry weight) have the most direct and indirect effect on Minituber fresh weight (as potato yield .In loam sand soil four traits (mean Minituber diameter, leaf area, total plant Minituber volume, total plant Minituber dry weight) were indicated to have the most direct and indirect effect on Minituber fresh weight (as potato yield).

Conclusions: Investigating the effect of applying silicate treatments in different concentrations on Minituber wet weight (as Minituber yield) by cluster analysis and path analysis showed that in both soils, Bentonite (2000 ppm) had the most effect on traits responsible for Minituber wet weight changes.

Keywords: Bentonite, Mintubers, Nanoclay, Nanosilica, Silicon

1- Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: nezami@um.ac.ir)